物理層にUWBを用いるWireless USB接続

従来のUSB 2.0インターフェースと同じところ，違うところ

Hilbert Zhang，Saravana Kumar

システムの記事

USB 2.0規格をワイヤレスに対応させようという動きが出てきている．2005年5月には，The Wireless USB Promoter Groupが物理層とMAC（media access control）層にマルチバンドOFDM方式のUWB（Ultra Wideband）を用いる「Wireless USB」仕様を公開した．ここでは，この仕様と従来のUSB 2.0の相違点をまとめた．（編集部）

USBは，これまでに策定されたパソコン周辺機器の接続バスの中で，もっとも成功したものの一つです．USBは，パソコン（ホスト）と周辺機器（デバイス）のどちらの製造元にも受け入れられており，2005年末までには5億台を超えるUSB製品が使用されるものと推定されています．USBが成功した要因としては，次のことが考えられます．

- 相互接続性を確保
- ホスト・スレーブ・アーキテクチャによってデバイスを簡素化
- 周辺機器との接続が容易
- 多数のデバイスを単一ホストに取り付け可能

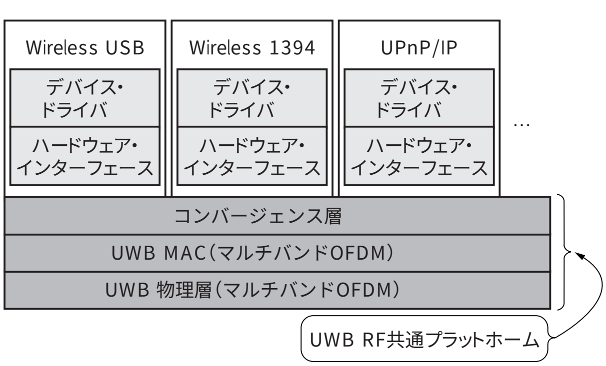


図1　Wireless USB
RF（物理層，MAC）の部分とコンバージェンス層までを共通プラットホームとして，業界団体WiMedia-MultiBand OFDM Alliance（WiMedia-MBOA）が規格策定を進めている．

最近では，ワイヤレス技術が成熟してきており，コストも下がっていることから，無線通信を介してUSB接続を実現しようという動きが出てきています．

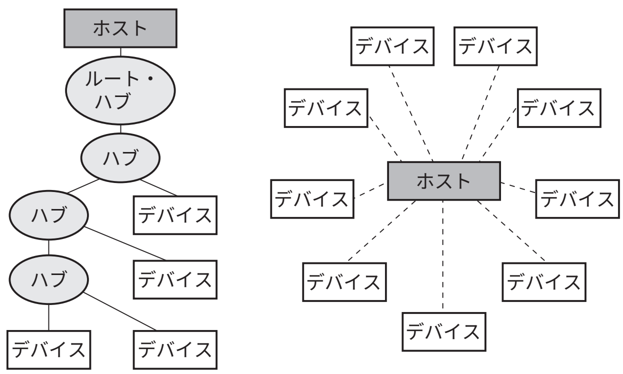
ここでは，短距離ワイヤレス通信のUWB技術を用いた「Wireless USB」というインターフェース規格について解説します（**図1**）．Wireless USBは通信方式（物理層およびMAC）としてマルチバンドOFDMを利用します（pp.128-129のコラム「MBOAのMAC」を参照）．2005年5月に，Wireless USB Promoter Group（米国Agere Systems社，米国Hewlett-Packard社，米国Intel社，米国Microsoft社，NEC，オランダRoyal Philips Electronics社，韓国Samsung Electronics社が参加）が最終仕様を策定しました．今後，認証テストやロゴのライセンスの策定については，USB-IF（Implementers Forum）へ移管されます．

Wireless USBでは，通信距離が3m以内で480Mbpsの広帯域を達成しています．Wireless USBを用いることで，めんどうなケーブルの敷設を行うことなく周辺機器を接続できるようになりますが，その反面，セキュリティや通信の信頼性，消費電力などの面で解決するべき課題もあります．

● スター型トポロジ対応でUSBハブは必要なくなる

Wireless USBでは，有線のUSBと同じようにホスト・スレーブ・アーキテクチャをとります．また，USB 2.0の四つの転送タイプ，すなわちコントロール転送，バルク転送，インタラプト転送，アイソクロナス転送のすべてに対応しています．

ホストとそれに接続されるWireless USBデバイスの集合は，「Wireless USBクラスタ」と呼ばれます．USB 2.0のツリー型トポロジとは異なり，Wireless USBクラスタはスター型トポロジとなります．Wireless USBホストに



（**a**）USB 2.0トポロジの例　　（**b**）Wireless USBトポロジの例

図2　トポロジ

USB 2.0ではツリー型トポロジをとっていたが，Wireless USBではスター型トポロジをとることが可能となり，ハブが必要なくなる．

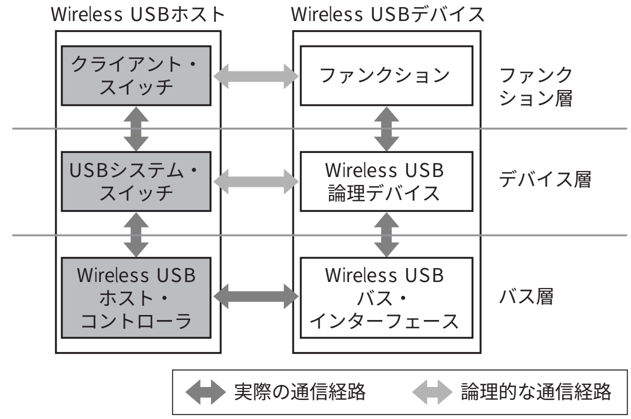


図3　プロトコル階層

USB 2.0と同じくファンクション層，デバイス層，バス層の三つからなる．ただし，バス層については，媒体が無線であるという特性から，データ転送について大幅に変更された．

表1　Wireless USBのデータ転送速度

	データ転送速度（Mbps）
ホスト	53.3，80，106.7，160，200，320，400，480
デバイス	53.3，106.7，200（これ以外はオプション）

は最大127台のデバイスを接続できるため，クラスタ内でハブを使用する必要はありません（**図2**）．

USB 2.0では，デバイスはケーブルを介してホストから電力供給を受けられました．一方，Wireless USBはケーブルを使用しないため，デバイスはすべて個別に電源を用意しておく必要があります．

USB 2.0は，ハイスピード・モード（480Mbps），フルスピード・モード（12Mbps），ロースピード・モード（1.5Mbps）の三つのデータ転送速度に対応しています．Wireless USBのホストとデバイスは，それぞれ**表1**に示すデータ転送速度に対応します[注1]．

Wireless USBのプロトコル階層は，USB 2.0と同様にファンクション層，デバイス層，バス層の三つからなります（**図3**）．アイソクロナス転送の場合を除き，USB 2.0のファンクション層のソフトウェア部品のほとんどをそのまま流用できます．Wireless USBのアイソクロナス転送では，無線通信におけるパケット転送の信頼性を向上させるための再試行のしくみ，および4ms以上のサービス間隔に対応するためのより大きなバッファが必要となります．

デバイス層には，セキュリティの拡張機能とワイヤレス媒体を管理するための拡張機能が追加されています．バス層は，媒体が無線であるという特性から，データ転送に関して大幅に変更されています．

● オーバヘッドを低減するため，バースト転送に対応

通常，すべてのUSBトランザクションには，トークン，データ，ハンドシェークの三つのフェーズがあります．Wireless USBのトランザクションもこれに従います．しかし，Wireless USBでは，送信から受信（あるいはその逆）への切り替えに10μs以上かかります．切り替え時間をできるだけ短くするため，トークン，データOUT，データINの順にトランザクションのパケットをグループ化しています．トークンのオーバヘッドによってさらに多くの時間がかからないように，Wireless USBではMMC（Micro-scheduled Management Commands）と呼ばれる単一の制御パケットにすべてのトークンを集約しています．

図4にWireless USBにおけるトランザクションの例を示します．最初に，ホストがMMCを送信します．すると，Wireless USBクラスタ内にあるデバイスがこのMMCを確認します．MMCには，ホストのクロック情報，次のMMCの開始時刻，CTA（チャネル時間割り当て）スロット，チャネル管理情報が含まれています．CTAは，デバイスがホストと通信するためのスケジュールを持っています．

ホストについては，MMCの直後にOUT転送（ホストからデバイスへの転送），その次にIN転送（デバイスからホストへの転送），最後にOUT転送用のハンドシェークが続

注1：Wireless USBでは53.3Mbpsを基本のデータ転送速度と定義している．すべての標準USB制御要求やMMC（Micro-scheduled Management Commands）と呼ばれる特別な制御トークン，ハンドシェーク，およびデバイス通知（DN）には，この53.3Mbpsのデータ転送が使用される．

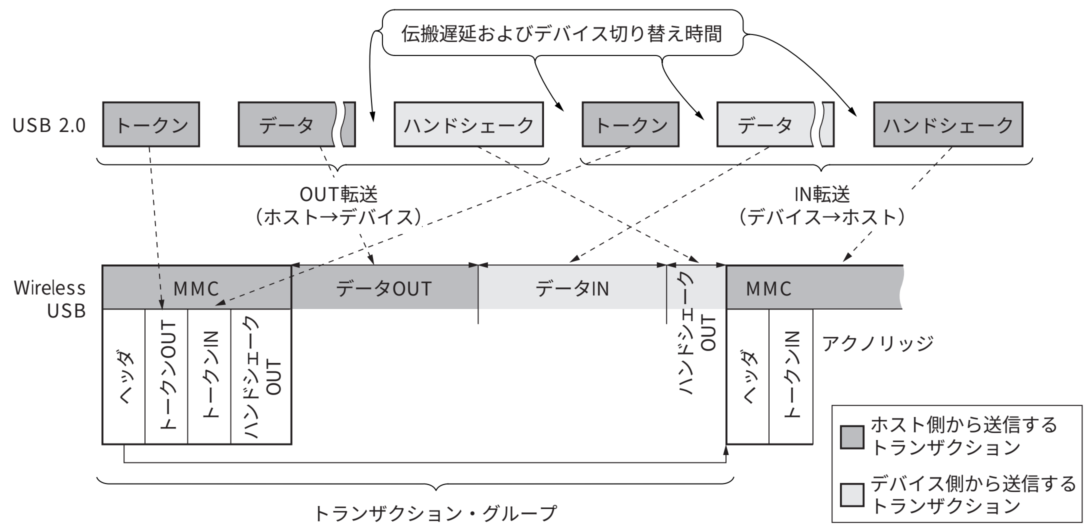


図4
トランザクション・プロトコルの比較
Wireless USBではトークンのオーバヘッドを低減させるため，MMC（Micro-scheduled Management Commands）と呼ばれる単一の制御パケットにすべてのトークンを集約している．

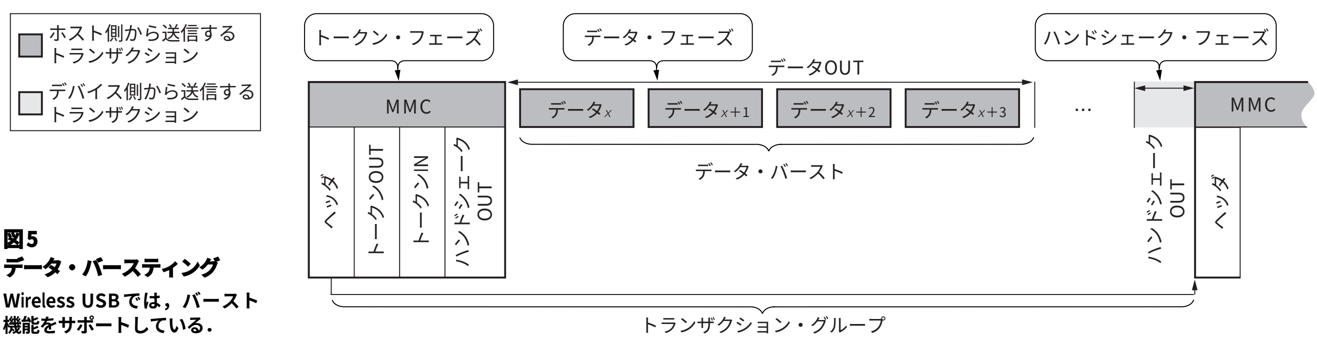


図5
データ・バースティング
Wireless USBでは，バースト機能をサポートしている．

くようにCTAのスケジュールを設定します．デバイスは，対応するCTAに従ってパケットの受信または送信を開始します．それ以外の時間はスリープ状態になり，ホスト・クロックにデバイスのクロックを同期させます．

転送時の各トランザクションのオーバヘッドを取り除くため，Wireless USBは特定のデバイスについて，1度のトランザクションで複数のデータ・パケットを転送するデータ・バースティングという機能を備えています（**図5**）．バースト・サイズは，1～16パケットの範囲で可変です．データ・バースティングに対応しているデバイスは，ディスクリプタ（記述子）を用いてホストにバースト機能が利用可能であることを通知します．ホストは，デバイスが転送可能なあらゆるバーストの組み合わせを選択することができます．なお，コントロール転送とインタラプト転送のエンドポイントは，バースト・モードをサポートしていません．

表2に，Wireless USBとUSB 2.0の転送の特徴を比較したものを簡単にまとめておきます．

● デバイスの通知は専用パケットを用いて行う

USB 2.0のデバイスは，ケーブル経由の電気信号を用いて，「接続」，「切断」，「リモート起動」などのイベントをホストに通知します．一方，Wireless USBのデバイスは，無線によるDN（デバイス通知）パケットを使用して上記のイベントをホストに通知します（**表3**）．Wireless USBのホストがデバイス通知CTAを備えたMMCを送信した後，デバイスはスロット化アロハ[注2]に基づいたDNTS（Device Notification Time Slot）を獲得し，デバイス通知イベントをホストに送信します（複数のデバイスが競合した場合，優先度の高いDNメッセージを送ったデバイスがDNTSを獲得する）．

USB 2.0のデバイスは，フロー制御にNAK（ネガティブ・アクノリッジ）[注3]およびNYET（ノット・イエット）[注4]など

注2：メディア・アクセス制御方式の一つ．時間軸を単位時間（スロット）に分割し，スロットに同期してパケットを送信する方式．
注3：転送のステータスがビジーなので，再送を要求している状態．
注4：正常に受信したが，次のOUT転送データを受信する準備ができていない状態．

表2　Wireless USBとUSB 2.0の比較

比較項目		USB 2.0	Wireless USB 1.0
データ転送速度		1.5Mbps（ロースピード），12Mbps（フルスピード），480Mbps（ハイスピード） コントロール転送とインタラプト転送の場合のみ	53.3Mbps，80Mbps，106.7Mbps，160Mbps，200Mbps，320Mbps，400Mbps，480Mbps
デバイス通知（脱着操作，ウェイクアップなど）		ケーブルからの電気的信号で通知	DNパケットによって通知
バースト・モード		非対応	バルク転送，アイソクロナス転送時のみ対応
電源供給		バスパワードとセルフパワード	セルフパワードのみ
コントロール転送	パケット・サイズ	最大64バイト	512バイト固定
	デバイスから応答がない場合の再送信	最大3回	最大7回
バルク転送	パケット・サイズ	最大512バイト	n（n＝1～7）×512バイト
	デバイスから応答がない場合の再送信	最大3回	最大7回
インタラプト転送	パケット・サイズ	最大64バイト	64バイト（省電力時）/1024バイト（標準電力時）
	サービス間隔	1ms～255ms（ロースピード/フルスピード時） 125ms～4s（ハイスピード時）	4ms～4s
	デバイスから応答がない場合の再送信	次のサービス間隔で再送信	省電力時：3回 標準電力時：5回
アイソクロナス転送	パケット・サイズ	最大1024バイト	最大3584バイト
	帯域制限	最大24Mバイト/s（ハイスピード） 最大1Mバイト/s（フルスピード）	最大5Mバイト/s
	サービス間隔	125ms～4s（ハイスピード） 1ms～32s（フルスピード）	4ms～4s
	再送信	再送信なし	サービス間隔当たり1回以上

を使用します．一方，Wireless USBの場合，インタラプト転送やアイソクロナス転送などの定期的な転送では，前のIN転送またはOUT転送に対してデバイスがNAKを返したとしても，ホストは次のサービス間隔においてトランザクションのスケジュールを設定します．また，コントロール転送やバルク転送などの非定期的な転送の場合，ホストはトランザクション中にデバイスからNAKを受信すると，DN_EPRdyを受信するまでその特定のエンドポイントに対してトランザクションのスケジュールを設定しません．

表3　デバイス通知メッセージ

DNメッセージ	意　味
DN_Connect	接続および再接続の通知
DN_Disconnect	切断の通知
DN_EPRdy	デバイス・エンドポイントがデータ転送を再開するための準備が整った際の通知
DN_MASAvailChanged	デバイスのメディア・アクセス・スロット（MAS）の変更
DN_RemoteWakeup	スリープ中のホストに対する起動の通知
DN_Sleep	デバイスが省電力状態に入る際の通知
DN_Alive	Keepalive IE *1への応答

*1 Keepalive IEは，IE（information elements；MMCに含まれる時間スロットの割り当てやDNTS，ホスト情報など）の一つ．

● ホストとデバイスの間の接続に128ビットIDを用いる

USB 2.0では，ケーブルを使用することにより，以下に示すようにデバイスとホストが安全に通信することができました．

1）ユーザがデバイスとホストを識別する
2）デバイスをホストに接続すれば，ユーザが意識することなくホストとデバイスの接続が認証される
3）信号はUSBケーブル内を通るので，悪意を持つ第三者による傍受を防ぐことができる

Wireless USBでは，以下に示すようなプロセスに従って，ホストとデバイスの接続を行います．

1）ホストとデバイスは，それぞれが持つ128ビットの識別子（CHIDとCDID）によって自分自身を識別する．その後，ホストが一意のCHIDとCDIDのペアを生成する
2）最初に接続するとき，ホストとデバイスは帯域内または帯域外のチャネルを使用し，128ビットの接続キー（CK）とともにCHIDとCDIDのペアを交換する．CHID，CDID，CKを接続コンテキスト（CC）と呼び，CCを交換した後は，ホストとデバイスは単に再接続のプロセスに従うだけとなる．ホストとデバイスは，4ウェイ・ハンドシェーク・プロセスを開始し，CKを使用することでお互いを認証する
3）4ウェイ・ハンドシェーク・プロセスの間に，ホストとデバイスはセッション・キー（SK）を取り出して，許可

Column　MBOAのMAC

Wireless USBは，MBOA（Multi-band OFDM Alliance）の定めるMAC（media access controller）層を使用します注A-1．MBOA MACはUWB技術を使用しており，無線で480Mbpsものデータ転送速度を実現します．UWBは3.1GHz～10.6GHzの周波数帯域で動作します．マルチバンドOFDMは，この7.5GHz帯域幅を14の帯域に分割しており，1帯域当たりの帯域幅は528MHzとなります．

14の帯域は五つのグループに分類されます．最初の四つのグループにはそれぞれ三つの帯域が含まれ，最後の一つのグループには二つの帯域が含まれます．三つの帯域のグループにはそれぞれ七つの論理チャネルがあり，二つの帯域のグループには二つの論理チャネルがあります．つまり，合計で最大30の論理チャネルが存在します．

各論理チャネルは3mの距離で最大480Mbpsのデータ転送速度に対応します．データ転送速度を53.3Mbpsにまで低減すると，距離は最大10mに広がります．単一のMBOAデバイスで対応できる距離は，「1ホップ」と呼ばれます．

すべてのMBOA MACデバイスには，一意の64ビットMACアドレス（EUI-64）が備わっています．フレームのオーバヘッドを低減するため，MBOAは64ビットMACアドレスを16ビットのデバイス・アドレス（DevAddr）に割り当てます．1m^{3}当たり最大64台のデバイスに対応する拡張クラスタ（2ホップ以内）には，この16ビット・アドレス空間で十分です．デバイスは，その拡張クラスタ内でのDevAddrの使用状況を確認することで，競合を検出します．競合が検出されれば，デバイスはそのDevAddrをランダムに生成することになります．

3ホップ以上離れているMBOAデバイスは，干渉を起こすことなく通信時間（エア・タイム）を再使用できます．この場合，例えば次に示すようなビーコン・スロットを用いて通信時間の割り当てを行います．

通信時間を管理するため，MBOA MACではメディア・アクセス・スロット（MAS）を規定しています．各MASは256μsの長さを持ち，256個のMASによってスーパフレーム（機器間でフレーム通信を行うための基本となる65536μs周期の信号）を構築します（**図A-1**）．デバイスは，スーパフレームごとにもっとも遅いクロックに同期させて，デバイス間のクロックのドリフトを制御しています．

節電のため，MBOA MACではビーコン期間（BP：beacon period）

注A-1：現在，ワイヤレス通信に対応したUSBについては，いくつかの半導体メーカなどから異なる通信方式が提案されている．

プロセスを完了する

Wireless USBでは次の二つの接続方式を使用します．

- USBケーブル方式：ホストからデバイスにCCを転送する帯域外方式注5
- 数値方式：Deffie-Hellmanプロトコル注6を使用して，ホストからデバイスにCCを転送する帯域内方式注7．中間者攻撃を防ぐため，ユーザはホストとデバイスの接続を認証するために両方の表示番号を確認する

ホストとデバイスの接続が完了すれば，AES-128注8を用いて，安全に通信することができます．

従来のUSBのパケット・エラー率（PER）は10^{-6}程度であり，非常に信頼性が高いと言えます．一方，UWBの場合，PERは10^{-1}程度です．PERを向上させるため，Wireless USBホストは，送信電力，データ転送速度，ペイロード・サイズ，バースト・サイズ，再送信，物理チャネルの移動といったパラメータを制御します．

注5：ホストと周辺機器の間で共通の秘密情報（コネクション・コンテキストなど）の通信を，Wireless USBチャネルを使用せず，赤外線や（有線の）USB，NFC（near field communication）などを使って安全に行う方式．

注6：第三者からの攻撃を防ぐため，暗号化と復号化に異なるかぎを用いる非対称暗号方式．安全性に問題のある媒体を通すことなく，かぎ（秘密情報）を交換することができる．

注7：共通の秘密情報の通信を，Wireless USBのRFチャネルを使って安全に行う方式．

注8：かぎの長さが128ビットのAES（advanced encryption standard）暗号化技術．

● デバイスの消費電力を抑えるためにRFをOFFにする

電力のほぼ70%がRF部で消費されることが知られています．Wireless USBの転送はTDMA方式を用いているため，デバイスはいつ受信していつ送信するかを正確に把握しています．したがって，デバイスを節電するもっとも効果的な方法は，アイドル期間中にデバイスのRF部の回路をOFFにすることです．

2番目に効果的な方法は，DN_Sleepを送信することで，デバイスに対していずれのトランザクションのスケジュールも設定しないようホストに要求することです．これによって，デバイスがスリープ状態に移行することで節電できるようになります．デバイスがトランザクションを再開するには，DN_RemoteWakeupをホストに送信します．

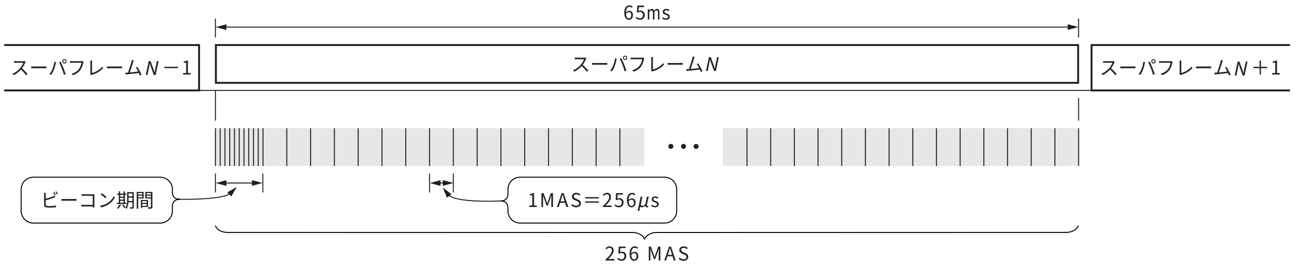
また，DN_Disconnectを送信し，ホストからデバイスを切り離して節電することもできます．その後，デバイスはホストと再接続することで，データ転送が可能となります．

Wireless USBでは，キーボードやマウス，ゲーム機器などの割り込みデバイスの消費電力をできるだけ抑えるため，デバイスがそのCTAに応答せずにスリープ・モードに移行できるようにしています．送信するデータがない場合，これらのデバイスは最大4秒の間スリープ状態にとどまれます．また，ホストがMMCの中でHostDisconnect_IEを送信し，すべてのデバイスを切断してチャネルを停

内にすべてのビーコンを送信しなければならないと規定されています．ビーコン期間としては，スーパフレームの最初の32のMAS（8 ms）を割り当てます．ビーコン期間では，各MASは三つのビーコン・スロット（1スロット当たり約85μs）に分割されています．ビーコン・スロット0，1は「信号スロット」と呼ばれます．デバイスは，必要に応じて信号スロット内にそのビーコンを複製して，ビーコン期間が拡張されていることを近隣デバイスに通知します．

拡張クラスタ内のビーコン・スロットの衝突を検知するため，デバイスはその近隣デバイスのビーコンを利用したり，あるいはデバイス自身のビーコンの送信を不規則に停止して，近隣デバイスがすでにそのビーコン・スロットを使用しているかどうかを確認します．衝突が検知されれば，デバイスは自分のビーコン・スロットを移動します．

このようなビーコン・スロットの移動によって別のクラスタのビーコン期間と重複した場合，デバイスはこの衝突を瞬時に解決するため，先にあったビーコン期間を「ホスト・ビーコン期間」としてとどまらせておきます．そして，後からきたビーコン期間はホスト・ビーコン期間の最後に移動させます．



図A-1　MBOA MACの基本的なスーパフレームの構成

止し，節電することもできます．

● 新しいデバイス・クラスによって既存のUSB機器に対応

既存のホスト（パソコン）やUSBデバイスをワイヤレス通信で接続できるようにするため，Wireless USBでは次のような二つの新しい「ワイヤ・アダプタ」というデバイス・クラスを定義しています（**図6**）．ワイヤ・アダプタ・デバイスを用いることで，既存のパソコンをアップグレードして，Wireless USBをサポートできるようになります．

HWA（host wire adapter）は，アップストリームに有線のUSB 2.0を持ったデバイスです．HWAは，ダウンストリームのWireless USBデバイスのホストとして動作します．

またDWA（device wire adapter）は，アップストリーム接続にWireless USBを用いるUSBデバイスです．DWAは，そのダウンストリーム・ポートに接続されたデバイスに対してUSB 2.0（有線）のホストとして動作します．

● 最大1Gbpsまでデータ転送速度の拡張が可能に

Wireless USB技術は，現在，パソコンとその周辺機器のインターフェースとして普及している業界標準のUSB 2.0を発展させたものです．Wireless USBは，デバイス・ドライバ，データ・フロー，データ転送速度，トポロジなど，既存のUSB 2.0の基盤をほとんどそのまま維持しているため，比較的容易に導入できると思われます．

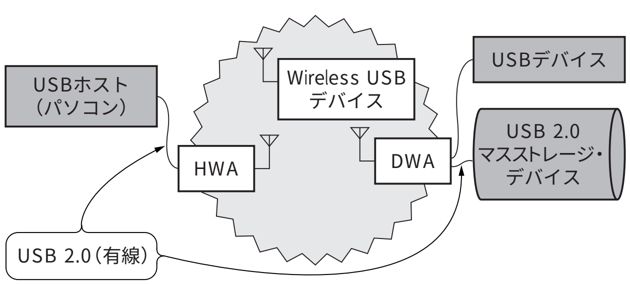


図6　HWAとDWA

HWAは有線のUSB 2.0を介して既存のホストとWireless USBデバイスを接続する．DWAは，既存のUSB 2.0デバイスとWireless USBバスを接続する．DWAに接続できるUSBデバイスは最大127個．

MBOA MAC技術とUWB技術を採用することにより，将来，データ転送速度を最大1Gbpsに拡張することが可能となります．従来のUSBのアプリケーションとは別に，Wireless USBでは，ホーム・ネットワーキングなどもそのアプリケーションに加わることになるでしょう．

Hilbert Zhang
Saravana Kumar
オランダPhilips Semiconductors社，Senior Software Engineer